

1.4 L'indagine macrosismica: metodologia, parametri del terremoto, questioni aperte

R. Camassi¹, P. Galli², A. Tertulliani³, S. Castenetto², A. Lucantoni², D. Molin², G. Naso², E. Peronace², F. Bernardini¹, V. Castelli¹, A. Cavaliere¹, E. Ercolani¹, S. Salimbeni¹, D. Tripone¹, G. Vannucci¹, L. Arcoraci³, M. Berardi³, C. Castellano³, S. Del Mese³, L. Graziani³, I. Leschiutta³, A. Maramai³, A. Massucci³, A. Rossi³, M. Vecchi³, R. Azzaro⁴, S. D'Amico⁴, F. Ferrari⁴, N. Mostaccio⁴, R. Platania⁴, L. Scarfi⁴, T. Tuvé⁴, L. Zuccarello⁴, S. Carlino⁵, A. Marturano⁵, P. Albini⁶, A. Gomez Capera⁶, M. Locati⁶, F. Meroni⁶, V. Pesina⁶, C. Piccarreda⁶, A. Rovida⁶, M. Stucchi⁶, G. Buffarini⁷, S. Paolini⁷, V. Verrubbi⁷, M. Mucciarelli⁸, R. Gallipoli⁹, M.S. Barbano¹⁰, I. Cecic¹¹, M. Godec¹¹ ■

1.4.1 Introduzione

Il terremoto che nella notte tra domenica e lunedì 6 Aprile 2009, alle ore 3.32 locali, ha devastato il centro storico della città di L'Aquila e decine di località lungo la Valle del Fiume Aterno, è stato caratterizzato da un'area mesosismica ($I_s > VII-VIII$ MCS) allungata per circa 20 km in direzione NW-SE. Tale area comprende 16 località con $I_s \geq VIII$ MCS, delle quali 6 hanno subito effetti di IX grado o superiori, tra cui Castelnuovo e Onna (IX-X), che sono risultate le località maggiormente danneggiate. Il terremoto ha provocato 308 vittime, la maggior parte delle quali nel centro storico dell'Aquila, ad Onna e a Villa Sant'Angelo. Il mainshock è stato preceduto da una lunga sequenza sismica ($M_l < 4.0$) iniziata a dicembre e culminata con un evento di $M_l = 4.1$ il 30 Marzo 2009. Due forti scosse intorno alla mezzanotte del 5 Aprile ($M_l = 3.9$ e $M_l = 3.5$) hanno indotto molte persone a trascorrere la notte all'aperto, così che l'evento deva-

stante delle 3.32 ha probabilmente causato meno vittime di quante la gravità dei danni ne avrebbe provocato. L'evento è stato avvertito fortemente in almeno 5 regioni dell'Italia centrale, dall'Abruzzo al Lazio, dal Molise all'Umbria, alle Marche meridionali; è stato inoltre avvertito in un gran parte dell'Italia peninsulare, dalla Puglia alla Toscana; risentimenti sporadici sono stati segnalati fino in Sicilia e Calabria, nel nord Italia dal Veneto, alla Lombardia e al Friuli, fino in Austria, Svizzera, Slovenia, Croazia, Montenegro e Albania. Nel seguito viene descritto, a grandi linee, il lungo e complesso lavoro di rilievo macrosismico, se ne forniscono i risultati conclusivi (Fig.1; Galli e Camassi, 2009) e vengono messi in evidenza alcuni elementi critici per una discussione di metodo. Vengono inoltre proposte alcune considerazioni sugli effetti di fagliazione superficiale osservati e sulle conseguenti implicazioni per l' *hazard* sismico che questo terremoto ha evidenziato.

1.4.2 Il Rilievo Macrosismico

In occasione di terremoti al di sopra della soglia del danno, il gruppo di pronto intervento macrosismico denominato QUEST (QUick Earthquake Survey Team), composto da operatori afferenti a diverse istituzioni (principalmente Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia e Dipartimento nazionale della Protezione Civile), si attiva al fine di realizzare il rilievo diretto degli effetti in termini di scala MCS (Sieberg, 1930). Tale

rilievo serve, contestualmente, come supporto decisionale alle operazioni di Protezione Civile e, successivamente, per il monitoraggio sistematico degli effetti e per la determinazione macrosismica dei parametri epicentrali del terremoto, in continuità con analoghe indagini condotte su terremoti storici, sulla base di ricerca, analisi, interpretazione e parametrizzazione di documentazione storica.

La notte del 6 aprile, subito dopo la scossa prin-

¹ Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Bologna. www.ingv.it

² Dipartimento della Protezione Civile Nazionale, Roma. www.protezionecivile.it

³ Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Roma. www.ingv.it

⁴ Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Catania. www.ingv.it

⁵ Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Napoli. www.ingv.it

⁶ Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Milano. www.ingv.it

⁷ ENEA, Roma. www.enea.it

⁸ Università della Basilicata, Potenza. www.unibas.it

⁹ CNR-IMAA, Potenza. www.imaa.cnr.it

¹⁰ Università di Catania. www.unict.it

¹¹ ARSO, Ljubljana, Slovenia. www.arso.gov.si

principale, avvertita fortemente anche a Roma, una prima squadra di operatori si è mobilitata e ha avviato il rilievo alle prime luci dell'alba, seguita da due squadre nel pomeriggio e da altre nei giorni successivi. Le squadre presenti a rotazione sul campo, costituite in totale da circa 50 unità di personale afferenti alle diverse istituzioni, hanno dovuto confrontarsi con l'oggettiva difficoltà di operare in aree ad alto rischio non ancora messe in sicurezza e nel pieno della fase iniziale di una sequenza molto complessa. Nonostante queste difficoltà, il gruppo operativo

QUEST è stato in grado di fornire costantemente al Dipartimento nazionale della Protezione Civile informazioni accurate e aggiornate sulla distribuzione degli effetti di danneggiamento. La tempestività dell'intervento è stata tale che la sera del 6 Aprile erano state rilevate 40 località, divenute 70 il giorno dopo, 130 il 9 Aprile, 185 il 15 Aprile, 281 il 26 Maggio e 316 il 1° Luglio. Molte di queste località sono state visitate da squadre diverse e molte sono state riviste in tempi successivi al fine di rendere omogenea la valutazione di intensità e di verificare eventuali

Fig. 1
Quadro generale degli effetti macrosismici; nel riquadro in rosso è evidenziata l'area epicentrale riportata nella figura 2. La stella indica l'epicentro strumentale.

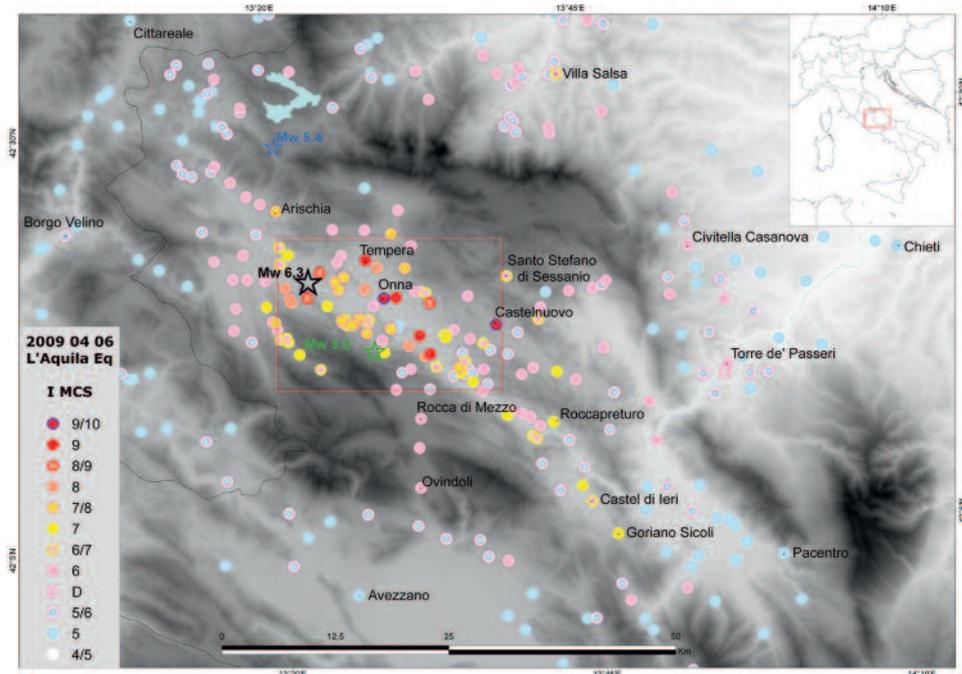
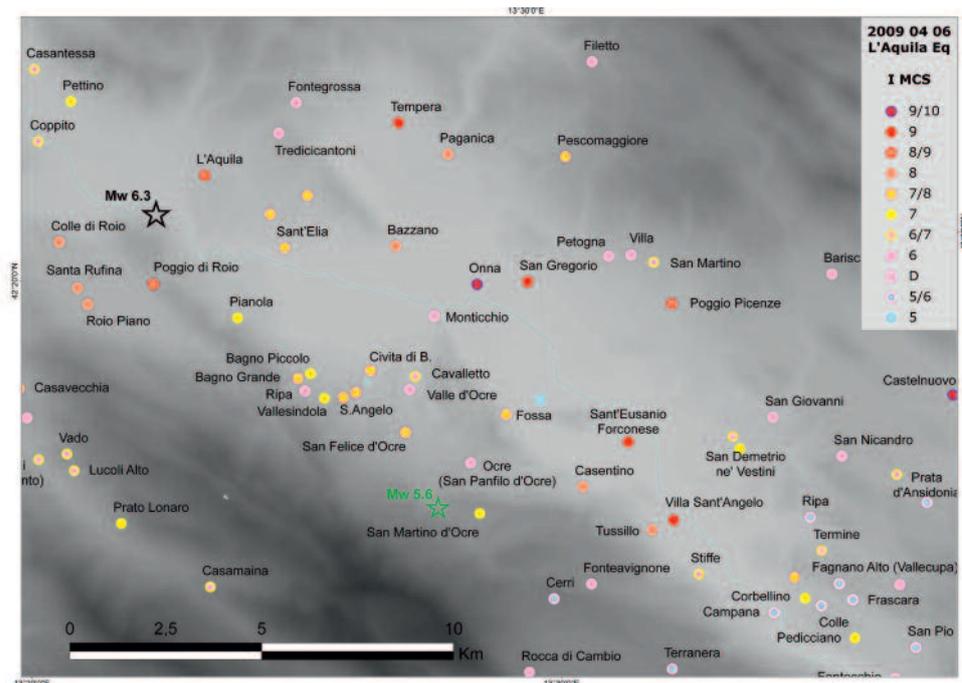


Fig. 2
Zoom sull'area epicentrale. La stella indica l'epicentro strumentale.



aggravamenti del danneggiamento.

In alcune località il rilievo è stato ripetuto anche in termini di scala EMS (Grünthal, 1998; i dati sono ancora in via di elaborazione), e la verifica più accurata degli effetti ha consentito una migliore calibrazione delle stesse stime secondo

1.4.3 Tipologie edilizie, condizioni di manutenzione e stima degli effetti

Nell'area aquilana sono presenti tipologie e condizioni edilizie molto diverse: è molto comune trovare negli stessi nuclei abitati la contemporanea presenza di edilizia tradizionale, generalmente in pietra non squadrata (spesso ciottoli alluvionali), di pezzatura molto irregolare e con sporadiche presenze di muratura a sacco, insieme a edifici in cemento armato, recenti o meno recenti.

Spesso, inoltre, nei centri storici di numerose località sono presenti gruppi di edifici in completo abbandono da decenni e parzialmente

la scala MCS.

Il dettaglio e l'estensione del rilievo, oltre a consentire una buona accuratezza nella determinazione dei parametri epicentrali del terremoto, ha fornito un contributo importante ai repertori macrosismici nazionali (DBMI04, Stucchi et al., 2007).

diroccati già prima del terremoto. Allo stesso tempo convivono, nel medesimo insediamento, edifici in muratura utilizzati abitualmente e in normali condizioni di manutenzione, edifici in pietra, mattoni o blocchetti di cemento, con solai e coperture in laterocemento, insieme a ville o condomini molto recenti in cemento armato.

Non è raro osservare edifici in muratura in cui sono visibili interventi relativamente recenti, con la sovrapposizione di cordolature e coperture in cemento armato sulla muratura originaria, senza un contestuale rinforzo delle strutture verticali.

Complessivamente la distribuzione sul territorio di queste tipologie edilizie è risultata molto



Foto 1
Poggio di Roio. Visibile la netta differenziazione tra il nucleo storico dell'abitato (sulla sinistra) e la parte più recente (sulla destra).

variabile: in qualche caso gli edifici più recenti rappresentano la semplice espansione centrifuga del vecchio centro abitato, in qualche altro caso ne sono una diramazione, in perfetta continuità, in una data direzione, oppure sono dislocati in un'area contigua, ma chiaramente separata dal centro storico, da una strada o da un elemento morfologico del terreno (Foto 1).

Questa variabilità di situazioni ha reso molto complessa la stima dell'intensità macrosismica. Il fatto che molti centri storici, come accennato,

siano urbanisticamente separati dagli agglomerati più recenti, ha indotto a ipotizzare di poter assegnare stime di intensità distinte: per il centro storico e per l'area di espansione. Nel far questo ci si è resi conto che, per alcune località, l'intensità macrosismica assegnata al solo nucleo storico sarebbe stata maggiore anche di 2-3 gradi MCS rispetto a quella assegnata alla parte più recente, e comunque sensibilmente diversa a quella mediata sulla località nel suo complesso. Infatti, ove un centro abitato si è sviluppato nel

Foto 2
Pianola. Distruzione
completa del primo piano.



tempo nell'area corrispondente all'insediamento originario, il grado MCS relativo alla parte più propriamente storica non differisce da quello assegnato all'intero abitato (San'Eusanio Forconese, Onna, Villa Sant'Angelo, Casentino), mentre per altre situazioni la differenza avrebbe oscillato tra 1/2 e 2 gradi. Un caso significativo è quello di Poggio di Roio dove l'intensità relativa al nucleo storico sarebbe incerta fra i gradi X e XI, mentre nella parte di sviluppo più recente sarebbe stimabile intorno al grado VII.

Questa problematica è risultata particolarmente rilevante per l'area urbana di L'Aquila, sia per l'estensione dell'abitato che per la sua variabilità edilizia. Per questo motivo la città è stata esplorata con molta attenzione anche per consentirne una valutazione in termini di EMS (Grünthal, 1998), oggetto di un'indagine necessariamente più complessa e approfondita, i cui risultati saranno resi disponibili in altra occasione. La stima di intensità che si formula per L'Aquila è sostanzialmente riferita all'area del centro storico, mentre il danneggiamento delle aree periferiche è generalmente inferiore di oltre un grado della scala MCS, rispetto all'area del centro storico.

1.4.4 Assegnazione delle intensità e parametri del terremoto

L'estrema variabilità delle tipologie edilizie presenti nei diversi insediamenti, la presenza di edifici in situazione di forte degrado preesistente e la frequente spiccata differenza di danneggiamento fra i centri storici e le parti di sviluppo recente, ha reso particolarmente critica la valutazione degli effetti in termini di intensità macrosi-

smica. La rilevante diversità del danneggiamento tra centri storici e settori recenti degli abitati pone comunque un serio problema per quanto concerne la comparazione del grado MCS con il grado assegnato per i terremoti storici, che è valutato su un patrimonio edilizio paragonabile a quello tuttora esistente nei centri storici. Questo problema richiederà indubbiamente ulteriori riflessioni e sperimentazioni a quanti operano in questo settore di ricerca.

Dal punto di vista della valutazione del comportamento degli edifici rispetto alla sollecitazione sismica si è osservato che gli edifici in C.A. hanno riportato percentualmente pochi danni strutturali. Solo in pochi casi si è verificato il collasso della struttura o di almeno un piano, come per una dozzina di edifici entro l'area urbana di L'Aquila, un edificio di Pianola (vedi Foto. 2), due tra Pettino e Cansatessa ed uno a San Gregorio. La maggior parte dei danni più gravi e dei crolli sono stati a carico degli edifici in pietra, in muratura e misti, soprattutto per quanto riguarda le parti più elevate dei manufatti (tetti, cornicioni, spigoli ecc.). In molti altri casi si è osservato il crollo totale dei solai all'interno di murature all'apparenza intatte.

smica. Queste differenze sono talmente marcate, in qualche caso, da non poter essere sufficientemente mediate dalla consueta espressione delle incertezze fra un grado e l'altro della scala.

Al fine di garantire una maggiore omogeneità nella fase di assegnazione dell'intensità macrosismica, l'elaborazione delle informazioni raccolte e la conseguente stima di intensità sono state realizzate avendo come riferimento la formaliz-



Foto 3
Castelnuovo.



Foto 4
Onna. Foto dall'elicottero.

zazione della scala Mercalli-Cancani-Sieberg (Sieberg, 1930) proposta da Molin (2003), che prevede esplicitamente la definizione di percentuali di danno presenti nei diversi gradi.

Le località che hanno subito gli effetti maggiori sono risultate Castelnuovo ed Onna (Foto. 3 e 4) per le quali è stata stimata un'intensità pari al IX-X MCS. In queste due località circa la metà degli edifici sono crollati e comunque gran parte sono stati gravemente danneggiati, con la morte di oltre un decimo della popolazione presente quella notte. Il IX grado MCS è stato assegnato a quelle località dove sono stati osservati danni strutturali estesi e crolli, come Tempera, San Gregorio, San Demetrio e Villa Sant'Angelo, mentre altre località con danni gravi e crolli più localizzati sono state classificate con il grado VIII MCS.

Come già accennato, un discorso a parte merita la città di L'Aquila, per la quale gli effetti relativi all'area del centro storico sono stati dell'VIII-IX

grado, per la diffusione di danni strutturali e di numerosi crolli parziali, mentre la parte nuova della città ha subito danni significativamente più contenuti.

Nella zona più prossima all'epicentro strumentale, vi è da segnalare nel bacino di Roio la distruzione pressoché totale del centro storico di Poggio di Roio (VIII-IX) ed i gravissimi danni ad altre tre località limitrofe (Colle di Roio, Santa Rufina e Roio Piano, VIII MCS).

All'interno del grave quadro di danneggiamento sopra descritto emergono alcune anomalie di intensità verso il basso che, ad apparente parità di tipologia costruttiva e vulnerabilità degli edifici, appaiono spiegabili solo ipotizzando effetti di deamplificazione del moto del suolo in superficie. È il caso, ad esempio, della località di Monticchio, a circa 2 Km da Onna, nella quale sono state osservate lesioni lievi in poche decine di edifici (VI MCS), così come nella frazione di

Cerro, prossima a Fossa (VII-VIII), ove praticamente non sono visibili danni (V MCS).

Altre anomalie, questa volta spiccatamente verso l'alto, sono state osservate in aree relativamente distanti dall'epicentro strumentale: il nucleo storico di Poggio Pienze (VIII-IX MCS) ed il già citato Castelnuovo (IX-X MCS) sono ad esempio entrambi ubicati nell'*hangingwall* della faglia (Galli et al., 2009) e circondati da località con intensità osservate comprese tra il V-VI ed il VI-VII. In particolare, Castelnuovo appare come il più evidente effetto di amplificazione locale dell'intero terremoto, ubicato com'è sulla sommità di una collinetta di limi bianchi del Pleistocene inferiore, sovrastati da un corpo residuo di conglomerati. Anche in questo caso, di fatto, l'acropoli fortificata è stata rasa praticamente al suolo (X-XI MCS), come già accaduto nel 1461. Sebbene anche l'area di VI grado appaia allungata in direzione NW-SE per oltre 70 km, essa presenta diverse riprese ed "isole" nei quadranti nordorientali fino a giungere in provincia di Teramo e Pescara, dove numerose località hanno subito un lieve danneggiamento diffuso. Nonostante queste ultime siano tutte distribuite nel *footwall* della faglia, esse sono in genere ubicate sulle successioni silicoclastiche esterne alla catena

mesocenozoica carbonatica e quindi potenzialmente affette sia da fenomeni di amplificazione locale (dovuti alla presenza di terreni con scadenti proprietà meccaniche) che di dissesto (di fatto, in molte di queste località le zone maggiormente danneggiate insistono su pendii in frana). Per quanto concerne, infine, la parametrizzazione macrosismica del terremoto, è possibile assegnare all'evento del 6 Aprile un'intensità epicentrale (I_0) pari al IX grado MCS ($I_{max}=IX-X$; vedi Tabella). L'epicentro macrosismico calcolato tramite l'algoritmo Boxer 3.3 (Gasperini, 2004), ricade poco a sud di San Gregorio, circa 10 km a SE di quello strumentale, rilocalizzato ad ovest de L'Aquila (INGV, 2009). La magnitudo equivalente calcolata con il medesimo algoritmo è $M_w=6.0$, inferiore a quella valutata strumentalmente. Questa differenza è spiegabile dal fatto che Boxer è stato compilato utilizzando le intensità "storiche", quelle assegnate, in altre parole, valutando gli effetti su un patrimonio edilizio probabilmente più vulnerabile di quello attuale. Utilizzando per il calcolo della M_w le intensità stimate per i soli centri storici di ciascuna località rilevata (in genere, tutte maggiori, come detto), il valore ottenuto tramite BOXER è $M_w=6.3$, ovvero lo stesso di quello strumentale.

1.4.5 Conclusioni

Il rilevamento macrosismico svolto all'indomani del terremoto del 6 aprile 2009 ha consentito la raccolta, l'elaborazione e la parametrizzazione di dati in termini di intensità macrosismica per 316 località con $I_s \geq V$ MCS, tutte visitate una o più volte dalle squadre che hanno contribuito al rilievo (Tab.1). Nel corso delle prime ore i risultati del rilevamento sono stati di primaria importanza ai fini della gestione dell'emergenza (indirizzo di soccorsi e mezzi), divenendo quindi uno strumento imprescindibile per la valutazione e perimetrazione delle aree di danneggiamento, sia per fini di protezione civile prima che come strumento legislativo poi.

L'intensità epicentrale calcolata sulla base dei dati rilevati è del IX grado MCS, e l'epicentro macrosismico risulta spostato di circa 10 km a SE di quello strumentale. Onna e Castelnuovo sono risultate le due località più duramente colpite (entrambe con effetti classificati IX-X MCS), mentre il numero in assoluto più alto di edifici danneggiati e di vittime si è verificato nel centro storico de L'Aquila (VIII-IX MCS, oltre 200 vittime). La magnitudo equivalente calcolata tramite l'algoritmo Boxer (Gasperini, 2004), utilizzando le intensità stimate per i soli centri storici delle località nell'area mesosismica – generalmente affetti da danni più severi – fornisce un

valore identico a quello valutato strumentalmente ($M_w=6.3$).

La distribuzione degli effetti si mostra allungata in direzione NW-SE, con un marcato effetto di direttività verso SE (figure 1 e 2). Questo fatto è congruente con la direzione della struttura sismogenetica responsabile del terremoto, la cui geometria e cinematica – oltre che dai dati strumentali – si è resa palese a seguito del fenomeno di fagliazione di superficie riconosciuto consensualmente da decine di geologi di diverse istituzioni lungo il c.d. sistema di faglie di Paganica. In particolare, secondo Falcucci et al. (2009), la fagliazione ha avuto luogo per circa 19 km, tra i paesi di Collebrincioni a NW e San Demetrio ne' Vestini a SE.

Il monitoraggio macrosismico di questo terremoto ha fatto emergere una serie di questioni metodologiche sulle procedure di applicazione delle scale macrosismiche ed alcune difficoltà meramente operative, che dovranno essere necessariamente approfondite per il futuro.

In primo luogo è risultato estremamente difficile applicare in modo omogeneo e coerente una scala (in particolare la scala MCS) in presenza di insediamenti abitati fortemente irregolari dal punto di vista della distribuzione spaziale delle diverse tipologie edilizie. In qualche caso lo sviluppo più recente di un insediamento abitato è

spazialmente ben distinguibile dal centro storico, ma nella maggior parte dei casi la situazione è risultata decisamente più complessa. In qualche caso, quindi, è teoricamente possibile assegnare intensità distinte per le diverse parti di un centro abitato, mentre nella maggior parte dei casi questa soluzione appare di difficile applicazione.

Un caso a parte è rappresentato dalla città di L'Aquila, un'area urbana di dimensioni notevoli, con un centro storico ben distinguibile dall'area di sviluppo più recente. In una situazione di questo tipo, la scala EMS98 - a differenza della scala MCS - suggerisce esplicitamente e ragionevolmente di differenziare la stima di intensità per le diverse porzioni di un'area urbana: tuttavia l'applicazione di questo criterio risulta comunque complesso, non essendo facilmente identificabili e isolabili parti diverse dello sviluppo urbano più recente.

In molte situazioni gli scenari di danno riscontrati appaiono sensibilmente divergenti da quelli previsti dalle scale (situazione riscontrata in modo

meno evidente anche per altri terremoti recenti), perlomeno in termini di regolarità di progressione del danneggiamento: anche da questo punto di vista la scala MCS è apparsa inadeguata a gestire la parametrizzazione degli effetti.

Infine, agli operatori che hanno partecipato alla raccolta ed elaborazione dei dati, particolarmente per quanti hanno una solida esperienza di indagini storiche, è apparso evidente quanto sia oggi difficile garantire la continuità fra i dati raccolti in questa occasione e quelli relativi a eventi storici, questi ultimi logicamente riferiti a centri abitati corrispondenti ai soli nuclei storici attuali. A titolo sperimentale si è tenuto traccia delle diverse informazioni sulle diverse parti dei centri abitati e sono state formulate anche stime di intensità distinte fra centri storici e parti di sviluppo recente. L'elaborazione di questi dati per la determinazione dei parametri epicentrali del terremoto fornisce risultati significativamente diversi.

Tutti questi problemi andranno ulteriormente approfonditi e ulteriori sperimentazioni dovranno essere realizzate in occasione di eventi futuri.

Bibliografia

- Faluccci E., Gori S., Peronace E., Fubelli G., Moro M., Saroli M., Giaccio B., Messina P., Naso G., Scardia G., Sposato A., Voltaggio M., Galli P., Galadini F., Pantosti D. (2009) - Surface faulting due to the L'Aquila earthquake of April 6th 2009 - *Seismological Research Letters*, in stampa.
- Galli P., Camassi R. (eds.), (2009) - Rapporto sugli effetti del terremoto aquilano del 6 aprile 2009, Rapporto congiunto DPC-INGV, 12 pp. http://portale.ingv.it/real-time-monitoring/quest/macrodef_sito.pdf
- Galli P., Camassi R., Azzaro R., Bernardini F., Castenetto S., Ercolani E., Molin D., Peronace E., Rossi A., Vecchi M., Tertulliani A. (2009) - Il terremoto aquilano del 6 aprile 2009: rilievo macrosismico, effetti di superficie ed implicazioni sismotettoniche. *Il Quaternario*, in stampa.
- Gasperini P. (2004) - Boxer program - Programma disponibile in internet al sito: <http://ibogfs.df.unibo.it/user2/paolo/www/boxer/boxer.html>

- Grünthal G. (ed.), (1998) - European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98) - European Seismological Commission, subcommission on Engineering Seismology, working Group Macroseismic Scales. Conseil de l'Europe, *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, vol. 15, Luxembourg.
- INGV (2009) - La sequenza sismica de L'Aquilano Aprile 2009, http://portale.ingv.it/primo-piano/archivio-primo-piano/notizie-2009/terremoto-6-aprile/copy_of_la-sequenza-sismica-dell-aquilano-aprile-2009/
- Sieberg A., (1930) - *Geologie der Erdbeben*, Handbuch der Geophysic, Tab. 2 e 3. Berlin.
- Molin D. (2003) - Considerazioni sull'eventuale adozione in Italia della scala macrosismica europea (EMS-1998) - Atti del 22° convegno nazionale NGTGS, ISBN/ISSN:88-900385-9-4, 06.21, 11 pp.
- Stucchi et alii (2007) - DBMI04, il database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI04 - <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI04/>, Quaderni di Geofisica, Vol 49, pp.38.